

Tuloksia käytännön rakenteiden värähtelyn hallinnasta aktiivisella vaimentimella

Jukka Linjama, Ismo Vessonen & Matti K Hakala

VTT VALMISTUSTEKNIikka



ISBN 951-38-4882-5
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374

Tekninen toimitus Leena Ukssoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1996

Linjama, Jukka, Vessonen, Ismo & Hakala, Matti K. Tuloksia käytännön rakenteiden värähtelyn hallinnasta aktiivisella vaimentimella. VTT Tiedotteita 1727, Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1996. 19 s.

UDK 534.83:62–752:62–1/9

Avainsanat damping, vibration, vibration damping, structures, dynamics, models, ships, vehicles, cars, tests

TIIVISTELMÄ

Julkaisussa kuvataan lyhyesti tuloksia aktiivisen massavaimentimen ja vastatärhistimen käytöstä värähtelyn vaimentamisessa. Passiivisen massavaimentimen, aktiivisen massavaimentimen ja inertiatärhistimen (vastatärhistimen) periaate kuvataan. Vaimentimen ja rakenteen dynamiikan mallinnusta ja kehitettyjä simulointimalleja kuvataan lyhyesti. Käytännön kokemuksia värähtelyn vaimennuksesta rakenteeseen liitettävällä aktiivisella vaimentimella esitellään. Kokeissa toimilaitteen ohjauksena käytettiin paikallista kiihtyvyyden takaisinkytkentää.

Aktiivisena ja passiivisena massavaimentimena toimiva sähködynaaminen tärhistin asennettiin laivan päämastoon vaimentamaan maston vaakasuuntaista värähtelyä. Merikojolla aktiivinen vaimennin pienensi värähtelyn neljäsosaan alkuperäisestä.

Aktiivista ja passiivista massavaimenninta kokeiltiin avoauton rungon vääntövärähtelyn vaimennukseen. Valittu vaimentimen sijoituspaikka ei ollut optimaalinen, ja saavutettava vaimentuma koeajotilanteessa oli enimmillään 20 %.

Servohydraulisen tärhistimen käyttöä kokeiltiin koneperustan värähtelyn vaimennukseen. Pyörivän epäkeskoakselin aiheuttama värähtely saatiin vastatärhistimen avulla pienemään puoleen alkuperäisestä.

ALKUSANAT

Tässä julkaisussa kuvattava työ on tehty TEKESin, yritysten ja VTT:n rahoittamassa ”Aktiivinen värähtelyn hallinta II” -projektissa. Hanke toteutettiin VTT Valmistustekniikan Laiva- ja konetekniikan ja VTT Automaation Koneautomaation tutkimusalueiden yhteistyönä vuosina 1994 - 1995. Edellisen osuuteen kuuluivat tutkimustyön koordinointi sekä käytännön sovelluskohteiden suunnittelu ja toteutus. Jälkimmäisen osuus sisälsi aktiivisen vaimennusjärjestelmän mallitusta ja simulointia. Lisäksi säätölakien analyysityössä yhteistyökumppanina oli Teknillisen korkeakoulun Sääntötekniikan laboratorio.

Tutkimushankkeessa lähdettiin toteuttamaan käytännön sovelluskohteissa aktiivisen värähtelyn vaimennuksen teknisiä toteutusperiaatteita. Periaatteita kokeiltiin hankkeen ensimmäisessä vaiheessa pienikokoisilla pöytädemostraatiolaitteilla vuosina 1993 - 1994 toteutetussa projektissa ”Aktiivinen värähtelyn hallinta”.

Valitut toteutusperiaatteet olivat 1) aktiivinen massavaimennin ja 2) aktiivinen vastatäristin. Rakennettavien pilot-järjestelmien kohteiksi valittiin laivan masto (yhteistyökumppanina Merivoimat), koneperusta (yhteistyökumppanina IVO-Yhtiöt) ja avoauto (yhteistyökumppanina Valmet Automotive Oy). Sovelluskohteiden käytännön suunnittelu- ja rakentamistyön lisäksi hankittiin tietämystä aktiivisen vaimennusjärjestelmän suunnittelumenetelmistä simulointimallien avulla.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT.....	4
1 JOHDANTO.....	6
2 AKTIIVINEN MASSAVAIMENNIN.....	7
2.1 Aktiivinen massavaimennin ja vastatäristin.....	7
2.2 Vaimentimen mallitus ja toiminnan simulointi.....	8
3 TULOKSIA KÄYTÄNNÖN RAKENTEISSA.....	10
3.1 Mastosovellus.....	10
3.1.1 Aktiivinen massavaimennin.....	10
3.1.2 Tuloksia.....	11
3.2 Avoautosovellus.....	12
3.3 Koneperustasosovellus.....	15
4 YHTEENVETO.....	18
LÄHDELUETTELO.....	19

1 JOHDANTO

Liiallinen värähtely voi muodostaa mukavuus-, turvallisuus-, tai kestävyysongelman erityyppisissä kulkuneuvoissa, koneissa tai rakennuksissa. Värähtelyongelmien eliminoiminen on tapahtunut perinteisesti passiivisin keinoin, esimerkiksi käyttämällä massiivisia vaimennusmateriaaleja. Viime aikoina on ruvettu soveltamaan myös aktiivisesti ohjattuja järjestelmiä. Rakenteen dynaamista käyttäytymistä voidaan tällöin kontrolloida muuttamalla hallitusti systeemin ominaisuuksia, kuten jäykkyyttä, vaimennusta tai massaa, tai kohdistamalla siihen sopivasti ohjattua värähtelyä kumoavaa voimaa. Tällöin puhutaan *puoliaktiivisesta* tai *aktiivisesta* värähtelyn vaimennuksesta tai yleisemmin *värähtelyn hallinnasta* [Hakala ym 1994].

Aktiivinen värähtelyn hallinta tulee kyseeseen silloin, kun perinteiset rakenteelliset ja passiiviset vaimennuskeinot eivät riitä tai ovat käytännössä mahdottomia toteuttaa. Tällainen tilanne on esimerkiksi silloin, kun herätteitä ei pystytä pienentämään riittävästi tai rakenteen paino, muoto tai mitat ovat rajoitettuja, jolloin systeemin dynaamisia ominaisuuksia ei voida virittää halutulla tavalla.

Aktiivinen toimilaitte voidaan mahdollisesti myös sisällyttää rakenteeseen jo suunnitteluvaiheessa, jolloin voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä (rakenteesta tulee yksinkertaisempi ja keveämpi; väsymiskestävyys lisääntyy; tuotantokatkokset ja laatuongelmat minimoituvat; paino-, materiaali- ja suunnittelukustannussäästöt).

Aktiivisen vastavoiman toteuttamisvaihtoehdot ovat maatettu voima, rakenteen sisäinen voima ja inertia voima. Näistä vaihtoehdoista inertia voimaperiaatteella toimivalle laitteelle vaikuttaisi olevan laajin soveltamisalue ja siitä näyttäisi olevan mahdollista kehittää yleiskäyttöinen ratkaisu erityyppisten rakenteiden värähtelyongelmiin [Linjama 1995]. Sovelluskohteina saattaisivat tulla kyseeseen

- auton, maastokulkuneuvon, työkoneen tai junan korin tai rungon vaimentaminen pieni- tai keskikokoisella aktiivisella vaimentimella
- laivan rungon ja suurempien osarakenteiden (kansirakenteiden jne.), raskaiden koneiden rungon ja perustusten värähtelyn vaimentaminen suurehkon voiman tuottavalla vastatäristimellä
- rakennusten ja kiinteiden rakenteiden aktiiviset massavaimentimet
- teollisuuden koneet ja laitteet
- hissit ja nosturit.

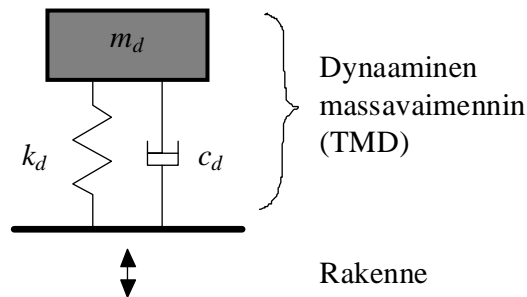
Tutkimuksen aikana yritysten kanssa käydyissä keskusteluissa on käynyt ilmi, että aktiivisen vaimennuksen kaltaisella uudella ratkaisumallilla voi olla mahdollista eliminoida joitakin tällä hetkellä ratkaisemattomaksi luonnehdittuja värähtelyongelmia ja siten saavuttaa myös merkittävää kilpailuetua. Samalla kuitenkin yrityksissä nähdään, että luotettavan käytännön toteutuksen saavuttamiseen tarvitaan vielä tutkimus- ja kehitystyötä.

Tässä esityksessä kuvataan lyhyesti tutkimusprojektissa syntyneitä tuloksia aktiivisen massavaimentimen ja vastatäristimen käytöstä värähtelyn vaimentamisessa. Passiivisen massavaimentimen, aktiivisen massavaimentimen ja inertiatäristimen (vastatäristimen) periaate kuvataan. Käytännön kokemuksia värähtelyn aktiivisesta vaimennuksesta mastorakenteessa, ajoneuvon rungossa ja koneperustassa esitellään.

2 AKTIIVINEN MASSAVAIMENNIN

2.1 AKTIIVINEN MASSAVAIMENNIN JA VASTATÄRISTIN

Passiivista massavaimenninta (TMD, Tuned Mass Damper, dynaaminen massavaimennin, kuva 1) on sovellettu värähtelyn vaimennukseen jo vuosikymmenien ajan [Timoshenko ym. 1994, Randall 1981, Warburton 1982]. Dynaamisessa massavaimentimessa resonanssissa värähtelevä apusysteemi aiheuttaa kiinnityspisteessä rakenteen (primäärisysteemin) värähtelyä kumoavan voiman.



Kuva A. Dynaaminen massavaimennin (Tuned Mass Damper, TMD).

Tavallisesti massavaimennin viritetään vaimentamaan vakiotajuista jatkuvaa värähtelyä. Massavaimennin vaimentaa myös laajakaistaista värähtelyä, esim transienttiherätteen tapauksessa tehostaa vapaan värähtelyn vaimenemista. Massavaimennin ei kuitenkaan vaimenna transientin "alkupiikkiä". Tehokas vaimennus vaatii joko

- suhteellisen suuren apumassan tai
- tarkan mekaanisen virityksen (pieni vaimennuskerroin c_d).

Optimaalisestikaan mitoitettu massavaimennin ei kuitenkaan aina toimi riittävän hyvin varsinkaan suurissa rakenteissa, joissa apumassa on suhteessa hyvin pieni. Tällöin on käytännössä hyvin hankala virittää apumassaa oikealle taajuudelle, sillä pienikin heitto mekaanisessa virityksessä aiheuttaa huomattavan heikennyksen vaimentimen suorituskyvyssä. Mitä pienempi vaimennuskerroin on, sitä hitaammin apumassa saavuttaa vakiotilan; kuormituksen alussa vaimennin ei toimi tarpeeksi tehokkaasti. Massa jatkaa värähtelyään vielä pitkään ulkoisen kuormituksen loputtua.

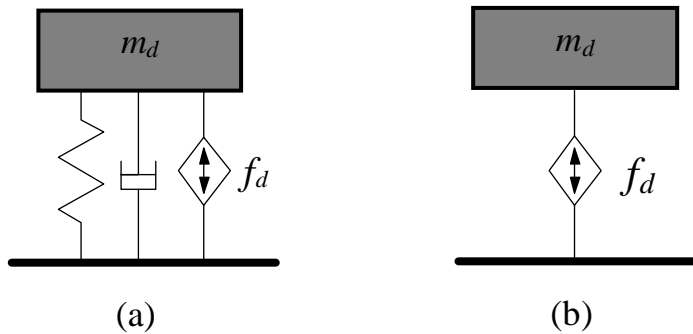
Massavaimentimen suorituskykyä voidaan parantaa ohjaamalla apumassan liikettä aktiivisesti [esim. Nishimura ym. 1992]. Vaimentimen apumassan ja rakenteen väliin asennetaan aktiivinen toimielin (servohydraulinen, sähkömagneettinen, peumaattinen, pietsokeraaminen, muistimateriaalit jne.), joka lisää värähtelyä kumoavaa voimaa. Käytännössä voidaan erottaa kaksi tapausta (kuva 2):

- 1. Aktiivinen massavaimennin.** Toimilaite on dynaamisen massavaimentimen rinnalla. Apumassa on mekaanisesti viritetty siten, että resonanssitilanteessa

käytetään hyväksi apumassan passiivinen vaimennuskyky. Täten suuriakin rakenteita voidaan vaimentaa suhteellisen pienellä toimilaitteen teholla. Passiiviseen verrattuna aktiivinen massavaimennin toimii laajemmalla taajuuskaistalla ja pienentää merkittävästi tarvittavaa apumassaa. Mekaaninen viritys kuitenkin rajoittaa tehokasta toimintakaistaa.

2. Aktiivinen vastatärustin (inertiatärustin). Toimilaite tuottaa vaimentavan voiman, joka toimii inertiamassaa vasten. Systemillä ei ole mekaanista viritystä. Toimilaitteelta vaaditaan enemmän tehoa kuin aktiivisen massavaimentimen tapauksessa, mutta vaimentimen taajuusaluetta voidaan muuttaa laajemmissa rajoissa.

Kokeissa käytetty apumassalla varustettu sähködynaaminen tärustin on aktiivinen massavaimennin (kuva 2 a), ja servohydraulinen tärustin on luonteeltaan vastatärustin (kuva 2 b).



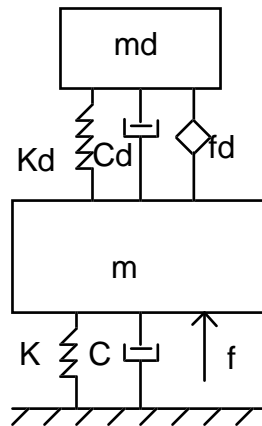
Kuva B. (a) Aktiivinen massavaimennin ja (b) vastatärustin (inertiatärustin).

2.2 VAIMENTIMEN MALLITUS JA TOIMINNAN SIMULOINTI

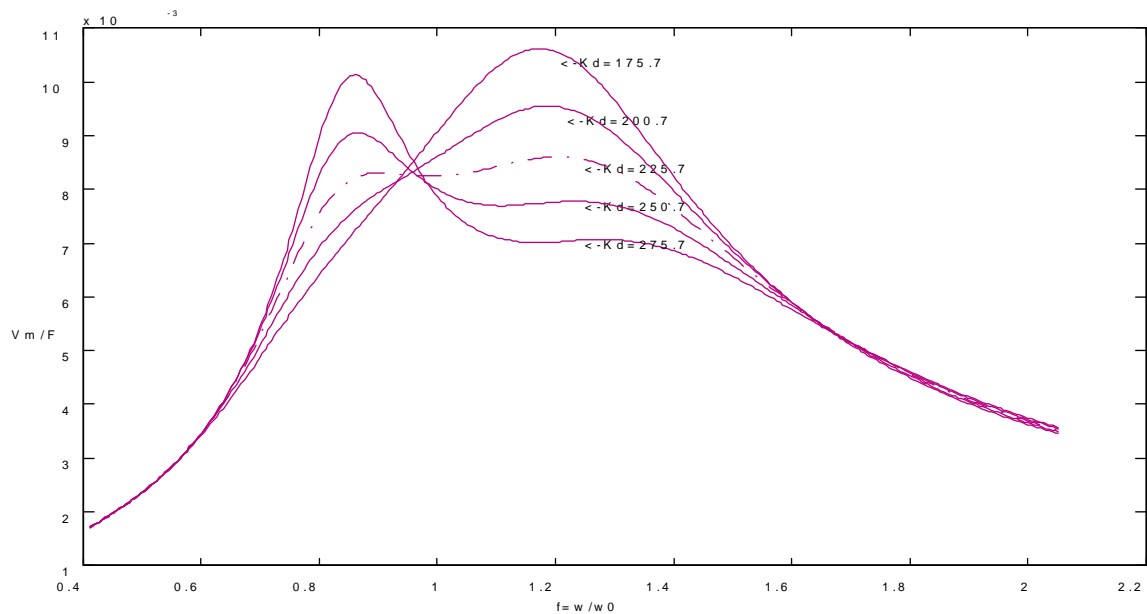
Käytännön aktiivisten vaimenninjärjestelmien suunnittelua varten tarvittavien simulointimallien kehittämiseksi projektissa tutkittiin aktiivisen massavaimentimen mallinnusta. Lähtökohtina olivat ideaalinen toimilaite (ideaalinen voimageneraattori) ja yhden vapausasteen rakenteen malli (yksi vaimennettava resonanssi, kuva 3). Mallitustyö toteutettiin säätöjärjestelmien suunnittelu- ja analyysiohjelmisto MATLABin lohkokaaaviomallina. Mallia kehitettiin lisäämällä sähködynaamisen tärustimen ominaisuuksia tarkemmin kuvaavat suureet [Vessonen 1996]. Lisäksi tutkittiin aktiivisen vaimentimen toimintaa useamman vapausasteen rakennemallissa [Linjama & Rantala 1996]. Ideaalisen aktiivisen massavaimentimen osalta MATLAB-mallilla tutkittiin myös erilaisten säätölakien (suoran takaisinkytkennän, optimisäädön, napojen asettelun) toimivuutta [Linjama & Lin 1995, Lin 1996]. Esimerkki teoreettisesta tarkastelusta MATLABin avulla on kuvassa 4, jossa esitetään yhden parametrin (massavaimentimen mekaanisen virituksen) muuttamisen vaikutus rakenteen taajuusvasteeseen.

Sähködynaamista tärhistintä varten kehitettiin laitteen mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet huomioon ottava taajuustason malli, jossa rakenne kuvataan yhden vapausasteen värähtelijänä. Malli on toteutettu MathCad-ohjelmalla [Vessonen 1996].

Sähköhydraulisen vastatärhistimen dynaamisen käyttäytymisen mallittamiseksi tehtiin ohjaushydrauliikan (servoventtiilin ja hydraulisylinterin) dynamiikan huomioiva MATLAB-tilamalli. Näin saatu hydraulitoimilaitteen malli yhdistettiin yhden vapausasteen rakennemalliin ja näillä simuloitiin systeemin käyttäytymistä ulkoisen herätevoiman vaikutuksesta [Järviluoma & Linjama 1996].



Kuva 3. Tarkasteltava yhden vapausasteen jousi-massasysteemi ja siihen liitetty aktiivinen massavaimennin [Linjama & Lin 1995].



Kuva 4. Apumassan jousivakion k_d muuttamisen vaikutus rakenteen taajuusvasteeseen v_m / F , kiihtyvyyystakaisinkytketty massavaimennin [Linjama & Lin 1995].(- - -) optimaalinen viritys.

3 TULOKSIA KÄYTÄNNÖN RAKENTEISSA

3.1 MASTOSOVELLUS

Merivoimien pilot-järjestelmässä aktiivisen massavaimentimena toimiva sähködynaaminen tärustin asennettiin sota-aluksen päämastoon vaimentamaan maston vaakasuuntaista värähtelyä. Tärustin laakeroitiin liikkumaan vaakasuunnassa siten, että tärustimen runko toimi liikkuvana apumassana. Ilman aktiivista ohjausta tärustin toimi passiivisena massavaimentimena, joka oli viritetty maston erään hallitsevan resonanssitaajuuden kohdalle. Aktiivisessa toimintatilassa tärustimen tehovahvistimeen ajettiin ohjaussignaali maston kiihtyvyys sopivalla vahvistuksella takaisinkytkettynä (suora kiihtyvyyden takaisinkytkentä).

Mekaaninen jousivakion viritys sekä takaisinkytkentävahvistuksen asetus haettiin tekemällä iskukokeita aluksen ollessa satamassa. Lähtökohtana oli maston mitattu dynaaminen käyttäytyminen ennen tärustimen asennusta.

3.1.1 Aktiivinen massavaimennin

Koetta varten rakennetun aktiivisen massavaimentimen suunnitelun lähtökohtana oli, että laitetta voidaan käyttää sekä vaaka- että pystysuuntaisen värähtelyn vaimentamiseen. Tätä varten rakennettiin kehikko, jonka sisään tärustin asennettiin lineaarijohteen ja lehtijousien avulla laakeroituna. Kehikon runko koottiin keveästä ja jäykästä alumiinisesta rakenneprofiilista. Kehikon dimensiot ovat pit = 460 mm, kork = 400 mm, lev = 220 mm ja kokonaismassa n. 40 kg (Kuva 5). Tärustin on tyyppiä Pye-Ling V50 Mk1, jonka maksimivoima on 200 N.

Tärustimen runko laakeroitiin kehikkoon vaimentimen liikkuvaksi apumassaksi ($m_d = 20$ kg; tärustin 14 kg + kiinnitys- ja laakerointiosat 6 kg). Tärustimen sisäisten jousien lisäksi vaimentimessa on ulkoiset lehtijouset, joiden lukumäärää lisäämällä ja vähentämällä apumassasysteemin jousivakiota k_d voidaan säätää sopivaksi. Olemassa olevien lehtijousien avulla apumassasysteemin ominaistajuutta voidaan säätää taajuusvälillä n. 6 Hz - 20 Hz. Ilman ohjausta systeemi toimi passiivisena massavaimentimena. Apumassan vaimennus c_d muodostuu laakeroinnin kitkasta sekä sähköisestä vaimennusvoimasta (tärustimen karan päässä oleva kela liikkuu tärustinrunгон kestopagneettikentässä). Tarvittaessa vaimennusta voidaan lisätä, joko erillisellä mekaanisella vaimentimella tai sähköisesti apumassan ja vaimennettavan kohteen suhteelliseen nopeuteen verrannollisella takaisinkytkennällä.



Kuva 5. Sähködynaamiseen täristimeen perustuva aktiivinen massavaimennin asennettuna ohjusveneen mastoon.

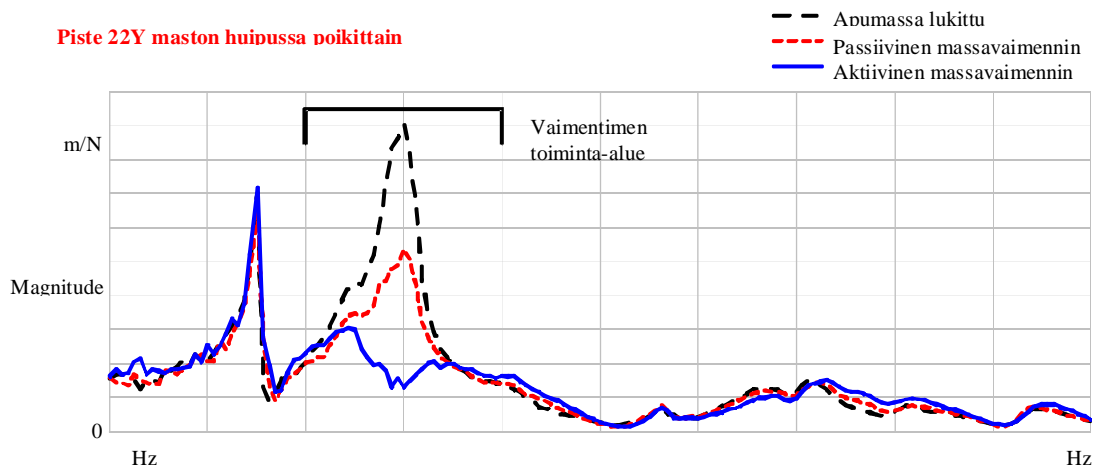
3.1.2 Tuloksia

Vaimentimen vaikutusta maston värähtelyyn tutkittiin laivan seisoessa iskukokeilla (kuva 6), ja merikoeajolla (kuva 7).

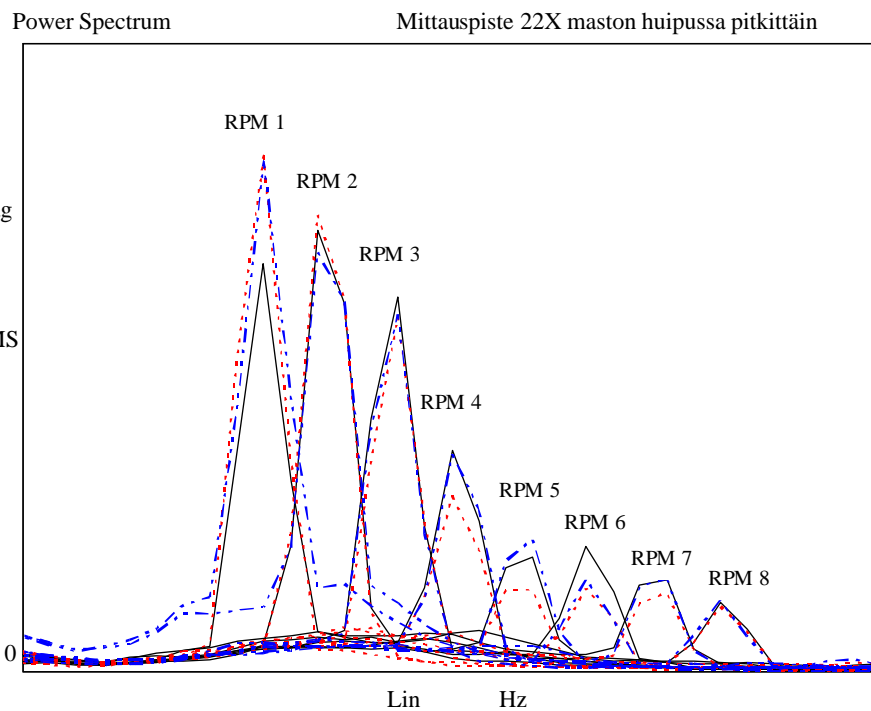
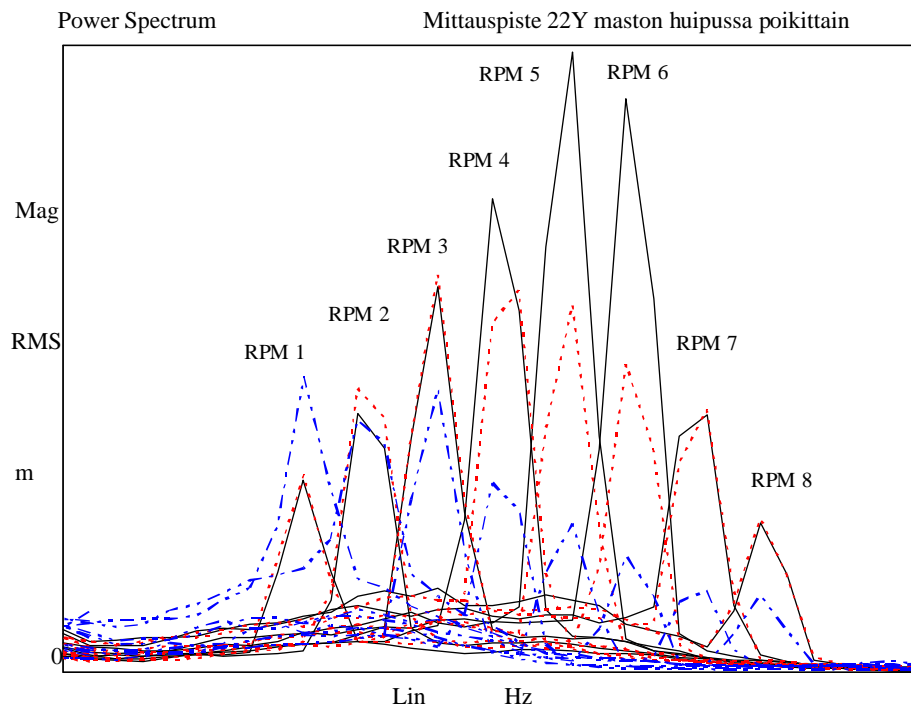
Merikoeajolla ajettiin pääkoneen eri kierrosluvuilla ja kokeiltiin käytännössä vaimentimen vaikutusta propulsiojärjestelmän herättämään maston poikittaisvärähtelyyn. Vertailutilanteena oli maston värähtely tilanteessa, jossa vaimentimen apumassa oli lukittu paikalleen. Sitten apumassa vapautettiin, ja koeajo toistettiin passiivisen massavaimentimen ollessa käytössä. Lopuksi tutkittiin aktiivisen massavaimentimen tapausta useammilla takaisinkytkentävahvistuksilla.

Tuloksena oli, että suurimman värähtelyn (resonanssin) kohdalla passiivinen massavaimennin sai värähtelytason putoamaan noin puoleen alkuperäisestä. Aktiivinen vaimennin pienensi värähtelyn alle neljäsosaan alkuperäisestä.

Piste 22Y maston huipussa poikittain



Kuva 6. Vaimentimen vaikutus maston vasteeseen iskukokeissa. Vaaka-akselilla taajuuskaista 20 Hz, pystyakselilla reseptanssi [m/N]. Tilanteet: vaimennin lukittu(_ _ _), passiivinen massavaimennin (_ _ _), aktiivinen massavaimennin (_____)



Kuva 7. Maston värähtely merikoeajolla (sivuttaissuunta (ylä) ja pitkittäissuunta (ala)) propulsiojärjestelmän eri kierrosluvuilla. Vaaka-akselilla taajuus (4 Hz kaista), pystyakselilla värähtelysiirtymän amplitudi. Eri kierroslukujen (rpm 1 - rpm 8) spektrit päällekkäin. Tilanteet: vaimennin lukittu (—), passiivinen massavaimennin (- - - -), aktiivinen massavaimennin (- .. - ..).

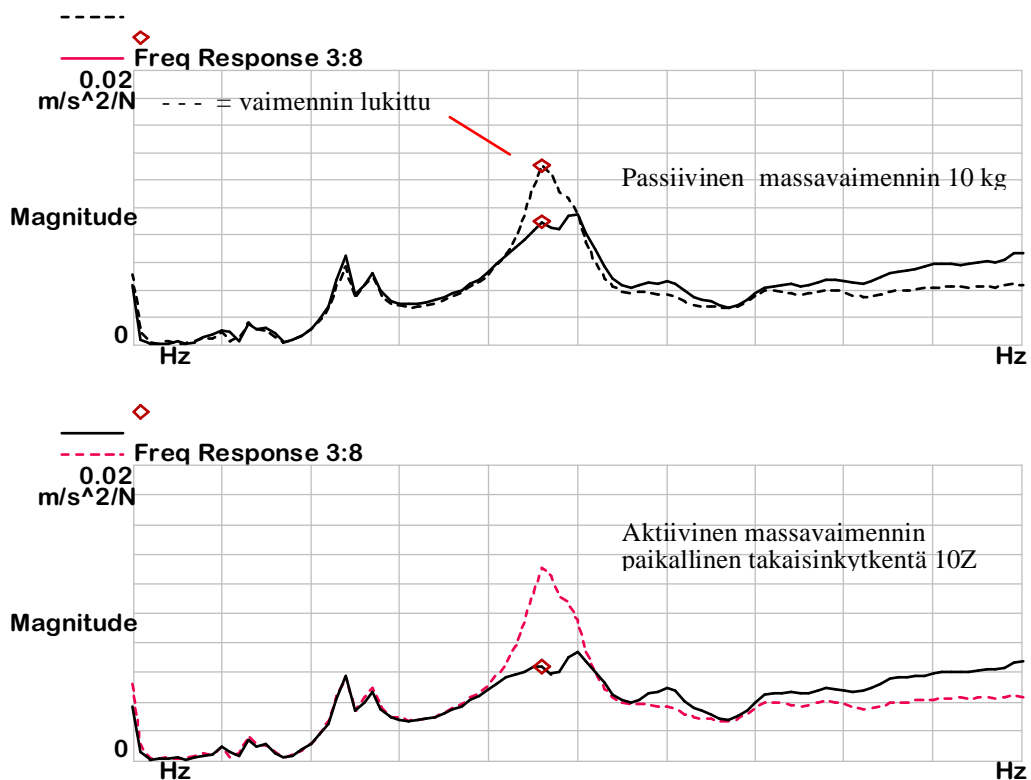
3.2 AVOAUTOSOVELLUS

Tämän sovelluskohteen avulla kokeiltiin, miten alustaherätteen aiheuttama avoauton rungon vääntöväärähtelyä voidaan hallita aktiivisella ja passiivisella massavaimentimella. Kokeissa erityishuomio kiinnitettiin vääntöväärähtelyn aikaansaamaan tuulilasikehyksen poikittaisliikkeeseen rungon resonanssitaajuudella.

Vaimentimena käytettiin 10 kg:n apumassalla varustettua sähködynaamista tärhistintä auton tavaratilan vasemmassa nurkassa. Täristin toimii ilman ohjausta myös passiivisena massavaimentimena. Aktiivisessa moodissa tärhistimen ohjaussignaalina käytettiin rungon kiihtyvyyttä (paikallinen kiihtyvyydestakaisinkytkentä). Tavaratilaan sijoitetun vaimentimen lisäksi kokeiltiin erikseen pienempää, tuulilasikehykseen kiinnitettyä passiivista 1 kg:n massaista dynaamista massavaimenninta.

Iskukokeissa *auton seisoessa* tavaratilan vaimentimen vaikutus näkyi selvästi vaimentimen viritystaajuuden ympärillä. Passiivisella vaimentimella vaste saatiin iskukokeissa pienemmään 30 % ja aktiivisella vaimentimella yli 50 % (kuva 8). Vertailutilanteessa vaimentimen apumassa oli lukittu paikalleen.

Koeajotilanteessa vaimentimen vaikutus oli selvästi vähäisempi kuin iskukokeissa. Syynä tähän on vaimentimen epäedullinen sijoituspaikka ajotilanteen kannalta. Auton väärähtelykäyttäytyminen oli ajotilanteessa erilainen kuin auton seisoessa. Passiivinen vaimennin alensi resonanssitaajuuden ympärillä värähtelytasoa n. 5 - 15 % ja aktiivinen vaimennin 5- -20 %. Tuulilasikehyksen keskelle sijoitetulla passiivisella massavaimentimella oli parempi sijoituspaikka, ja sillä saatiin n. 20 % värähtelytason vaimentuma koeajotilanteessa.



Kuva 8. Iskukokeissa mitattu passiivisen ja aktiivisen vaimentimen vaikutus avoauton tuulilasiraamin vasteeseen. Heräte pystysuunnassa takakulmaan, taajuuskaista 25 Hz. Vertailutilanne (- - -): vaimentimen apumassa lukittuna.

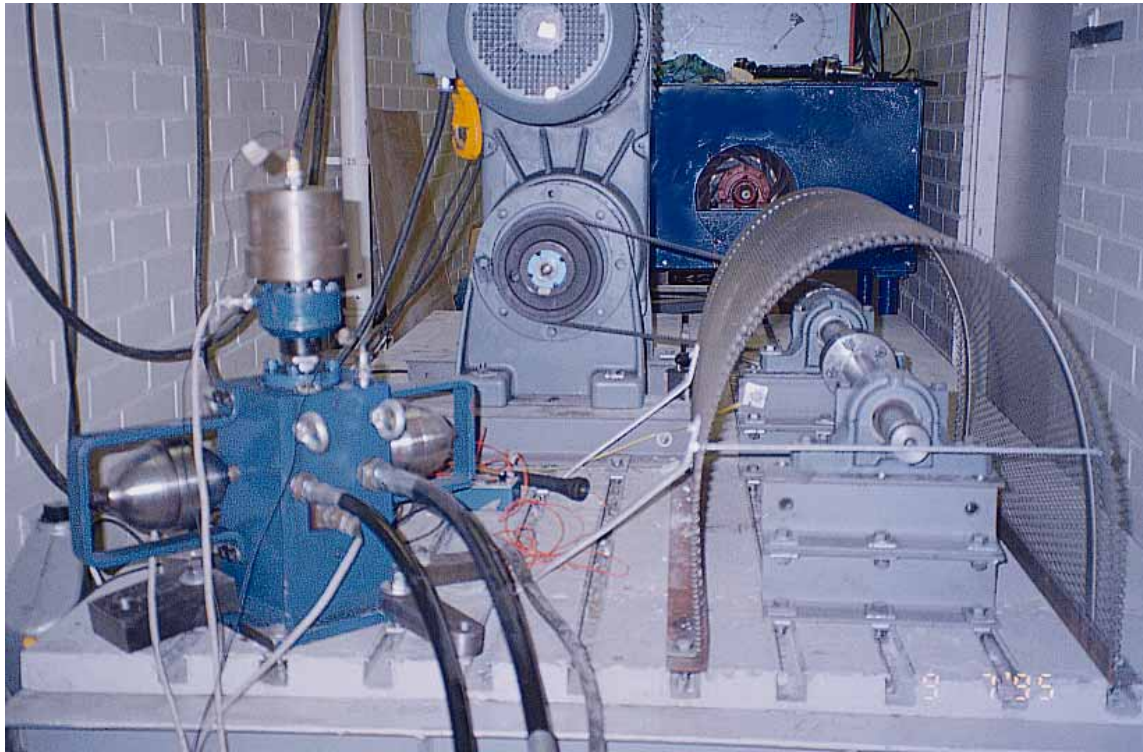
3.3 KONEPERUSTASOVELLUS

Koejärjestelyssä tutkittiin koneperustan (1,5 m x 3,0 m, massa n. 2 tonnia) värähtelyn vaimennusta aktiivisella vastatäristimellä. Valokuva kokeesta on kuvassa 9. Värähtelyn herätteenä oli epäkeskoakseli, jota pyöritti sähkömoottori variaattorin kautta. Vastatäristimenä käytettiin aineenkoestustarkoituksiin käytettävää servohydraulista tärhistintä inertiamoodissa. Sylinteriin oli kiinnitetty 10 kg:n apumassa. Takaisinkytkentäsignaalina käytettiin perustan värähtelykiihtyvyyttä tai -nopeutta sopivasti kaistanpäästösuodatettuna, kuva 10.

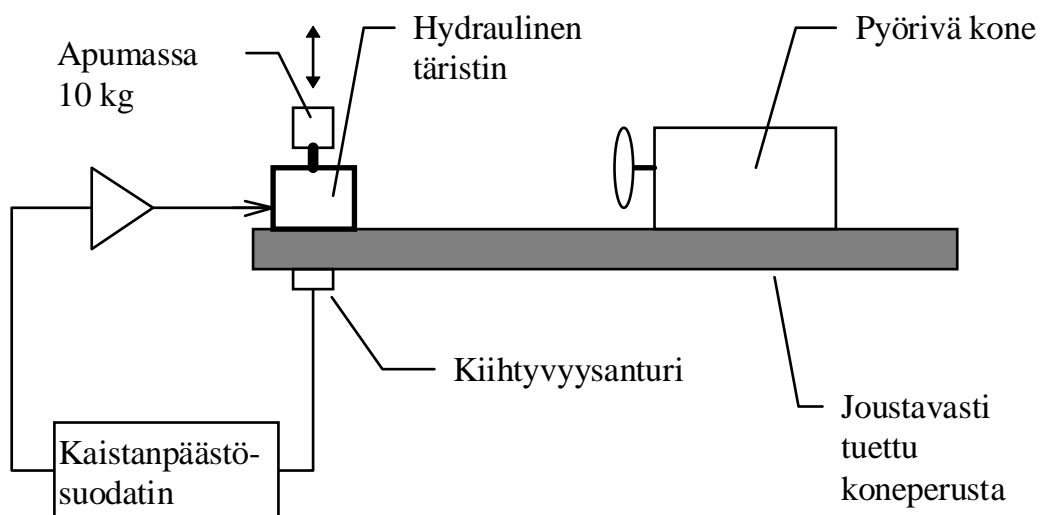
Ennen varsinaisia vastatäristinkokeita selvitettiin mittauksin tärhistimen taajuusvasteominaisuuksia sopivien ohjausparametrien valitsemista varten ja tehtiin koneperustan moodi-analyysi. Näiden perusteella valittiin vastatäristimen sijoituspaikka ja vaimennettava taajuusalue. Tärhistimen asennuksen jälkeen haettiin vastatäristimelle sopivia ohjausparametreja epäkeskoakselin pyörityskokeilla sekä tutkittiin perustan dynaamisten ominaisuuksien muuttumista iskuvasarakokein.

Lopulta vastatäristin säädettiin vaimentamaan koneperustan elastista ominaismuotoa 72 Hz:n taajuudella. Epätasapainossa olevan tällä taajuudella pyörivän akselin aiheuttama värähtely

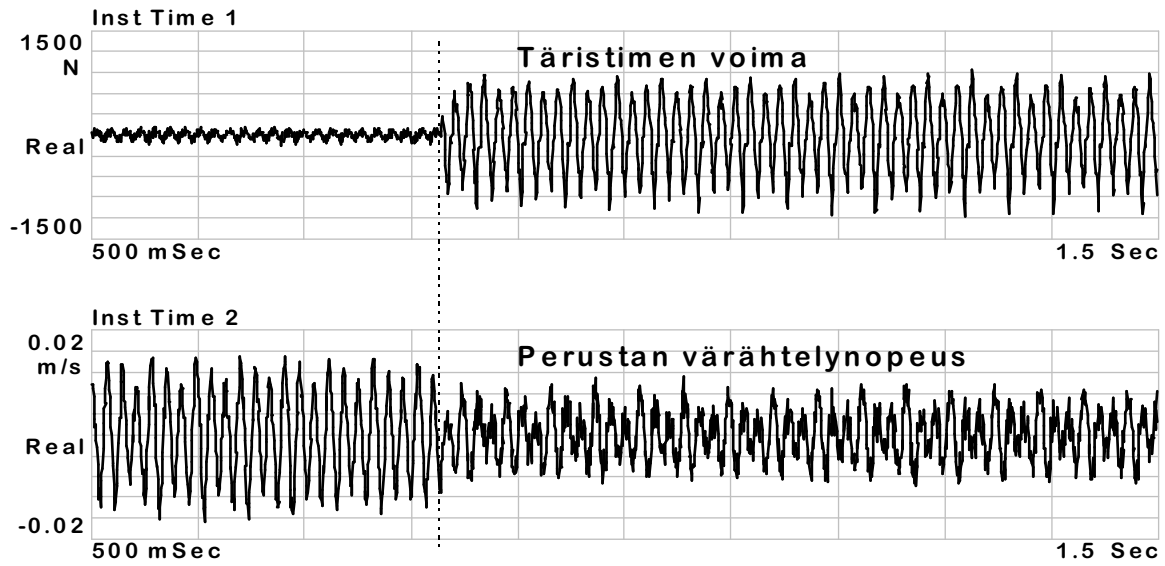
saatiin pienemään puoleen alkuperäisestä, kun vastatärstin kytkettiin toimimaan, kuvat 11 ja 12.



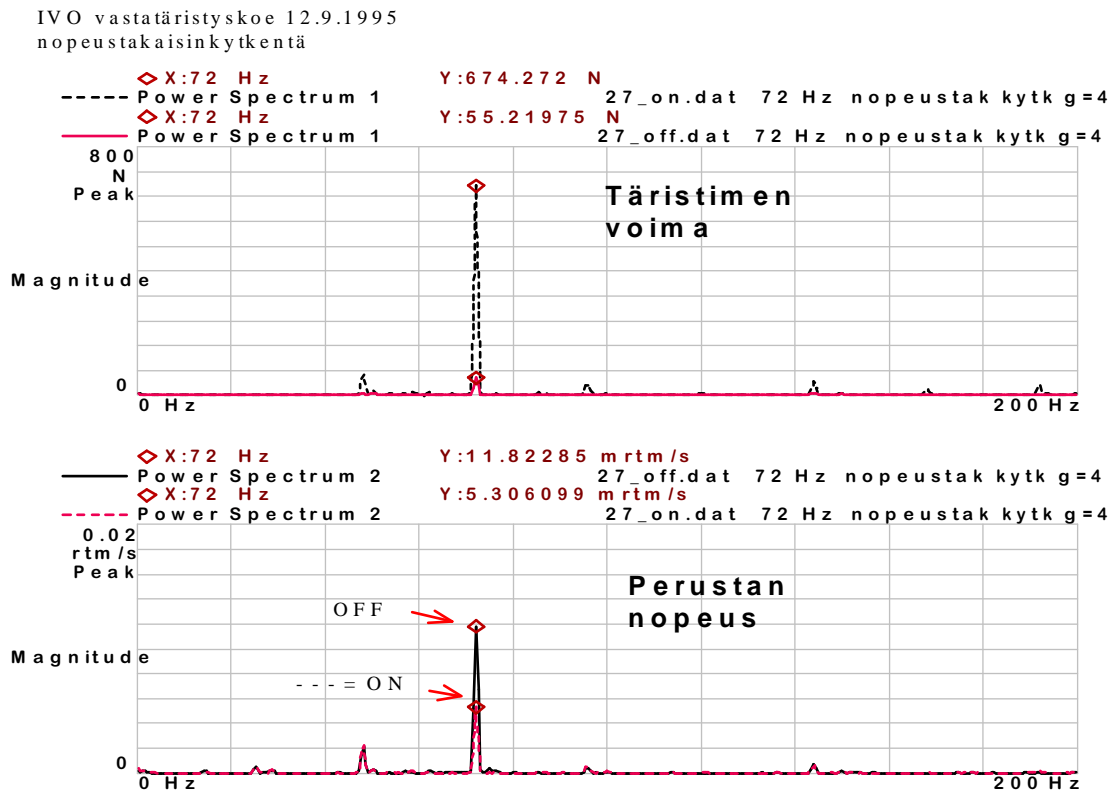
Kuva 9. Valokuva koejärjestelystä. Servohydraulinen tärstin apumassoineen vasemmalla, pyörivä akseli oikealla.



Kuva 10. Kaavio koneperustan värähtelyn vaimennuksen vastatärstinkokeesta



Kuva 11. Mitattu koneperustan värähtelynopeus ja täristimen voimasignaali. Katkoviivan kohdalla vastatäristin kytkettiin päälle, ohjauksena perustan nopeussignaali.



Kuva 12. Kuvan 11 signaalien spektrit. (- - - OFF) vastatäristin pois päältä, (— ON) = vastatäristin päällä.

4 YHTEENVETO

Tutkimuksessa pääpaino oli rakenteeseen liitettävän aktiivisen vaimentimen toiminnan selvittämisessä käytännön olosuhteissa. Sovelluskohteissa toteutettiin sähködynaamiseen täristimeen ja servohydrauliseen täristimeen perustuvia massavaimenninratkaisuja. Kokeellisen työn rinnalla kehitettiin mallitus- ja simulointimenetelmiä vaimentimen suunnittelua varten.

Aktiivisen vaimennusjärjestelmän onnistumisen edellytyksenä on, että tunnetaan seuraavat seikat:

- rakenteen dynaamiset ominaisuudet (mitataan ja mallinnetaan)
- toimilaitteen oma dynamiikka (mitataan ja mallinnetaan)
- värähtelyheräte (käyttötilanne)
- toimilaitteen (täristimen) rajoitukset.

Usein käytännön sovelluksissa pullonkaulana ovat viime kädessä toimilaitteen rajoitukset (paino, tila, teho vaatimus, luotettavuus, huollon tarve tms.). Sopivan (halvan, vähän energiaa kuluttavan, luotettavan) toimilaitteen löytäminen mahdollistaisi monta vielä periaatteen asteella olevaa värähtelyn- ja äänenhallinnan sovellusta.

Johtopäätöksenä voidaan tutkimushankkeen perusteella sanoa, että olemassa olevaan rakenteeseen liitettävällä, kohtuullisen kokoisella paikallisesti toimivalla aktiivisella vaimentimella on mahdollista saada aikaiseksi merkitsevä värähtelytason pieneneminen.

LÄHDELUETTELO

- Hakala, M. K, Kullaa, J., Kivento, T. & Linjama, J. 1994. Mekaanisten värähtelyjen hallinta. Kirjallisuustutkimus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1610. 109 s.
- Järviluoma, M. ja Linjama, J. 1996, Servohydraulisen vastatäristimen mallinnus MATLAB-tilamallilla. Työraportti VTT Valmistustekniikka VALB-130. 23 s.
- Lin, J. 1996. Design of active dampers for mechanical vibrations. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu TKK, Sääätötekniikan laboratorio. 97 s.
- Linjama, J. & Lin, J. 1995. Mekaanisen värähtelijän aktiivisen vaimennussäätöjärjestelmien analysointi. Työraportti. VTT Valmistustekniikka VALB-112. 10s. + liitt. 40 s.
- Linjama, J. 1995. Kokemuksia värähtelyn vaimennuksesta aktiivisellamassavaimentimella. Akustiikkapäivä 1995, Tampere 25. - 26.10.1995. Esitelmät. Akustinen Seura ry. s. 33 - 38.
- Linjama, J. & Rantala, S. 1996. Aktiivisen massavaimentimen toiminnansimulointi MATLAB-lohkokaaviomallilla. Työraportti. VTT Valmistustekniikka VALB-132. 30 s.
- Nishimura, I. ym. 1992. Active Tuned Mass Damper. *Smart Mater. Struct.* **1**, s. 306 - 311.
- Timoshenko, S., Young, D. H. & Weaver, W. J, 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New york: John Wiley & Sons, Inc. 521 s.
- Randall S. E. 1981. Optimum vibration absorbers for linear damped system. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, **103**, s. 908 - 913.
- Vessonen, I. 1996. Sähködynaamisen täristimen mekaanisten ja sähköisten ominaisuuksien mallinnus taajuustasossa. Työraportti. VTT Valmistustekniikka VALB-131. 20 s.
- Warburton, G. B. 1982. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **10**, s. 381 - 401.